

XII ENCONTRO NACIONAL DE ÁGUAS URBANAS

ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DE DESLIZAMENTOS DE CORPOS HUMANOS NA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO A JUSANTE DA BARRAGEM DE SANTA HELENA- BA DECORRENTE DE SUA RUPTURA HIPOTÉTICA

*Luan Marcos da Silva Vieira*¹; *Andrea Sousa Fontes*²; *André Luiz Andrade Simões*³ & *Murilo Pereira da Silva Conceição*⁴

RESUMO – Rupturas de barragens geralmente causam inúmeros prejuízos em decorrência da propagação da onda de cheia. A instabilidade do corpo humano nessas inundações é um fator que compromete a segurança do indivíduo, que pode vir a deslizar, tombar e ser arrastado pelo escoamento. Dessa forma, visando maior compreensão dos processos da instabilidade de corpo humano em eventos de ruptura de barragens, esse trabalho tem como objetivo analisar a ocorrência de instabilidade por deslizamento na planície de inundação resultante da ruptura hipotética da barragem de Santa Helena – BA. Para isso foram levantadas informações necessárias para simulação matemática da ruptura, com o uso do software HEC-RAS em sua versão bidimensional, e emprego da equação de instabilidade de corpo por deslizamento proposta por ROTAVA *et al.* (2013). Constatou-se que na maior parte da planície de inundação o indivíduo pode vir a deslizar e, além disso, a força de empuxo presente no equacionamento contribuiu para a grande extensão da área de risco por deslizamento.

ABSTRACT– Dams breaks generally causes numerous damages and damages to population, environment and economic systems in the floodplain, due to the propagation of the flood wave. The instability of the human body in these floods is a factor that compromises the safety of the individual, who may slide, fall and be dragged by the flow. Thus, aiming at a better understanding of the processes related to the study of dam rupture and analysis of human body instability, this work aims to analyze the occurrence of slip instability in the floodplain due to the hypothetical rupture of the dam in Santa Helena in the state of Bahia. In order to do so, the necessary information was gathered for mathematical simulation of the system by the HEC-RAS software in its two-dimensional, and related the results of velocity and flow height with the mathematical equation of sliding body instability by ROTAVA *et al.* (2013). Finally, it was found that in most of the floodplain the individual may slide and, in addition, the thrust force present in the equation may have contributed to the great extension of the area of risk by sliding.

Palavras-Chave – Instabilidade de corpo humano, deslizamento, ruptura de barragens.

INTRODUÇÃO

Desastres relacionados a rupturas de barragens geralmente provocam diversos impactos e danos para o meio ambiente, sistemas econômicos e à população residente na planície de inundação. Os efeitos desse tipo desastre nos seres humanos durante a passagem da onda de cheia dependem de

1) Mestrando em Águas Saneamento e Meio Ambiente - UFBA. e-mail: luan_msv@hotmail.com

2) Professora Adjunto, CETEC/UFRB – Campus Cruz das Almas, Bahia. e-mail: andreafontes@ufrb.edu.br

4) Professor Adjunto, UFBA –Salvador, Bahia. e-mail: andre.simoes@ufba.br

3) Granduando em Engenharia Civil – UFRB. e-mail: pereiramurilos@gmail.com

inúmeros fatores, como experiência em situações de emergências, estado psicológico, e a ação de mecanismos físicos que causam a perda de equilíbrio do corpo humano, como o tombamento e o deslizamento.

A perda de equilíbrio de corpos humanos em inundações é resultado da interação rápida entre a água e o sujeito (ARRIGHI *et al.*, 2017). Diversas pesquisas já foram feitas buscando aumentar a compreensão dos mecanismos que interferem na instabilidade de corpos humanos em inundações (JONKMAN e PENNING ROWSELL, 2008; MILANESI *et al.*, 2015).

Dessa forma, diversos autores tentaram descrever matematicamente o comportamento do corpo devido à ação dos principais mecanismos físicos que causam a instabilidade do corpo humano, o deslizamento e o tombamento, como realizado por XIA *et al.* (2014) e MILANESI *et al.* (2015). Nessa pesquisa foi analisada a instabilidade do corpo por deslizamento, também conhecida como instabilidade por atrito. Sua ocorrência é verificada quando a força de arrasto induzida pelo escoamento supera a resistência do atrito existente entre o pé do indivíduo e a superfície (XIA *et al.*, 2014).

No contexto de comportamento de corpos humanos durante a propagação de onda de cheia decorrente da ruptura de barragens, esse estudo tem como objetivo analisar a ocorrência da instabilidade por deslizamento na planície de inundação produzida pela ruptura hipotética da barragem de Santa Helena – BA, e visa fornecer uma visão geral de todo o processo, de forma a contribuir em sua compreensão, e auxiliar no planejamento urbano e a definição de sistemas de alertas.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia desse trabalho consistiu em caracterizar a área de estudo, executar o levantamento e tratamento dos dados, simular matematicamente a ruptura hipotética da barragem de Santa Helena-BA, aplicar os resultados da simulação hidráulica de velocidade de escoamento e altura de lâmina d'água a equação de instabilidade de corpo por deslizamento proposta por Rotava *et al.* (2013), e finalmente, gerar manchas de inundações com a possível ocorrência de deslizamento por um adulto.

Área de estudo

A área de estudo contempla o vale a jusante da barragem de Santa Helena na Bahia, no município de Camaçari, na região metropolitana de Salvador. Em 1979 a barragem foi construída no rio Jacuípe com a principal finalidade de abastecimento humano e nos dias atuais atende municípios

como Lauro de Freitas, Salvador, Simões Filho e Madre de Deus. A área de estudo é apresentada na Figura 1.

Em 1985 a barragem de Santa Helena rompeu devido um mau comportamento hidráulico da estrutura, que provocou uma subpressão da laje do canal sangradouro e sua destruição (SSRH, 1985 *apud* MENEZES, 2016). Todo vale a jusante da barragem foi inundado e foram diversos os efeitos, não houve perdas de vidas, mas os danos ambientais e econômicos foram significativos (A TARDE, 1985). Entre 2001 e 2005 a barragem foi reconstruída e hoje abastece a região metropolitana de Salvador (LIMA *et al.*, 2010).

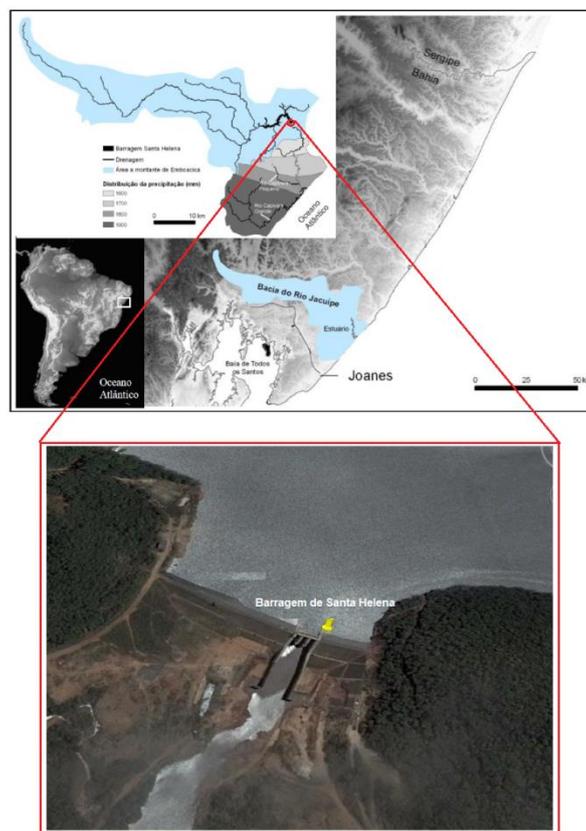


Figura 1 – Localização da área e vista área da barragem de Santa Helena
Fonte: Menezes (2016)

O vale a jusante do barramento é caracterizado por conter intensa vegetação de médio e grande porte, além de bancos de areia. A paisagem se modifica à medida que a área litorânea se aproxima, pois é onde se concentra maior densidade populacional e urbanização (Figura 2).

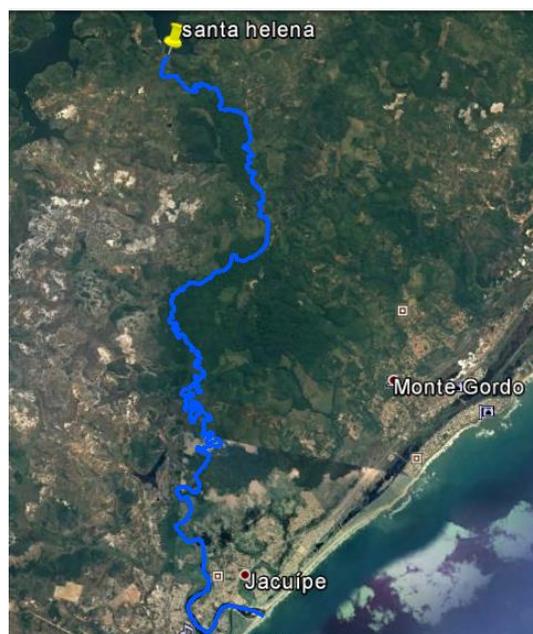


Figura 2 – Vale a jusante da barragem de Santa Helena - BA
Fonte: Adaptado de Google Earth (2018)

Levantamento e tratamento de dados

Os principais dados utilizados se referem à topografia do terreno e as informações da barragem. Foram disponibilizadas pela Empresa Baiana de Águas e Saneamento da Bahia S.A – EMBASA, 41 seções topobatimétricas da calha do rio Jacuípe e pela Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia – CONDER, a topografia do terreno, em curvas de nível, na escala de 1:10000.

A partir dessas informações foi estabelecido o Modelo Digital de Terreno – MDT, no Sistema de Informações Geográficas (SIG) da ESRI, o ArcGis, com referência espacial UTM WGS, zona 24. O coeficiente de Manning adotado seguiu a proposta de Menezes (2016), com faixas de valores determinados a partir de observações de campo e recomendações da literatura de acordo com o descrito a seguir.

- Canal principal: 0,03-0,065 (quanto maior o coeficiente, a geometria se torna mais sinuosa e a vegetação mais intensa);
- Planície de inundação: 0,1-0,15 (quanto maior, mais urbanizada é a área).

A declividade do terreno igual a igual a 0,00018 m/m e hidrograma de ruptura foram disponibilizadas por Menezes (2016), elaborado a partir do tempo de pico igual a 0,9 h e vazão de pico igual a 15.156, 02 m³/s. De posse de todas essas informações foi elaborado o MDT.

Simulação da onda de ruptura

A modelagem da propagação da onda de cheia decorrente da ruptura hipotética da barragem de Santa Helena foi executada a partir do hidrograma de ruptura proposto por Menezes (2016) com auxílio do modelo hidrodinâmico HEC-RAS 5.0 (versão bidimensional) para simulação do processo. As condições de contorno inseridas no *software* foi o hidrograma de ruptura a montante e a jusante a declividade do terreno.

O HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center-River Analysis System*) foi desenvolvido em 1964 pelo Hydrologic Engineering Center do U.S. Army Corps of Engineers (USACE) dos EUA. Em 2016 foi lançada sua versão bidimensional que oferece a opção para o usuário de escolher o método de cálculo 2D por meio das equações completas ou simplificada de Saint-Venant, o que oferece maior flexibilidade. Segundo Brunner (2016), as equações completas de Saint-Venant resolvem uma gama maior de problemas; em contrapartida, as equações simplificadas de Saint-Venant oferecem maior rapidez e estabilidade ao sistema.

São utilizadas duas equações para descrever o escoamento em superfície livre em canais, as Equações 1 e 2 (CHAUDHRY, 2008):

Equação da conservação da massa:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + D \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{ql}{B} = 0 \quad (1)$$

Equação da quantidade de movimento linear:

$$S_f = S_o - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{V^2}{2g} + y \right) - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2)$$

Onde, V é a velocidade de fluxo, ∂y é o diferencial da profundidade da água, ql é um termo referente a uma vazão lateral (entrada/influxo ou saída/efluxo), ∂x é o diferencial da distância (adotada como positiva com sentido a jusante), ∂t é o diferencial tempo, B é a massa, D é a razão entre a área molhada de do escoamento e a massa, S_o é a declividade do fundo do canal, S_f é a declividade da linha de energia e g a gravidade local.

Após a simulação da onda de cheia, os resultados hidráulicos de velocidade de escoamento e alturas de lâminas d'água foram relacionados com a Equação 3, de instabilidade de deslizamento proposta por Rotava *et al.* (2013). Rotava *et al.* (2013) analisaram os mecanismos físicos que causavam a instabilidade do corpo humano e constataram que a inclusão da força de empuxo nas equações de instabilidade de corpo era um critério que reduziu as relações de altura de lâmina d'água e velocidade de escoamento, relação essa conhecida como perigo ou risco hidrodinâmico (BALBI, 2008).

$$h v_c^2 = \frac{\mu(F_{person} - F_{buoy})}{0,5 C_D B \rho} \quad (3)$$

Na Equação 3, F_{buoy} é a força de empuxo, em Newton.

$$F_{buoy} = \rho_s V_c g \quad , \quad (4)$$

Em que, ρ_s é a massa específica do fluido (g/cm^3), V_c é o volume submerso da pessoa (m^3), g é a aceleração da gravidade local (m/s^2) e m é a massa do corpo [kg]. O volume submerso é dado por (caso $h \leq l$):

$$V_c = \frac{hm}{L\rho} \quad , \quad (5)$$

Em que h é a profundidade da água (m), ρ é a massa específica da pessoa, assumida igual a $1,00 \text{ g/cm}^3$ e $1,00 \text{ g/cm}^3$ também é a massa específica do fluido. O coeficiente de arrasto indicado pelo autor é igual a 1,1.

Para esse trabalho, a geração de manchas de inundações pela ocorrência de deslizamento decorrente da propagação de onda de cheia foi estabelecida a partir de um modelo de corpo humano com atributos físicos de altura e massa iguais a 1,70 m e 70 kg, respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As manchas de inundações máximas e valores das variáveis altura e velocidades de escoamento resultantes da simulação matemática estão mostrados na Figura 4.

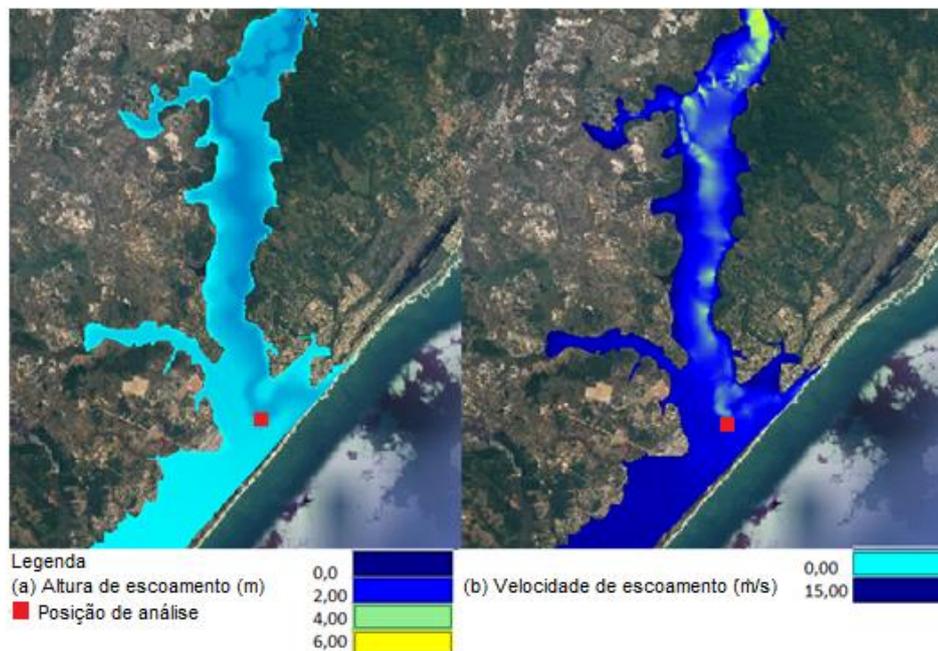


Figura 4 – Mancha de inundação máxima para recorte da área de estudo para (a) altura de escoamento e (b) para velocidade de escoamento

Fonte: próprio autor

A posição de análise em destaque foi escolhida por ser um local com probabilidade de ocupação humana. Nessa posição os valores das variáveis hidráulicas se comportam conforme os gráficos da Figura 5.

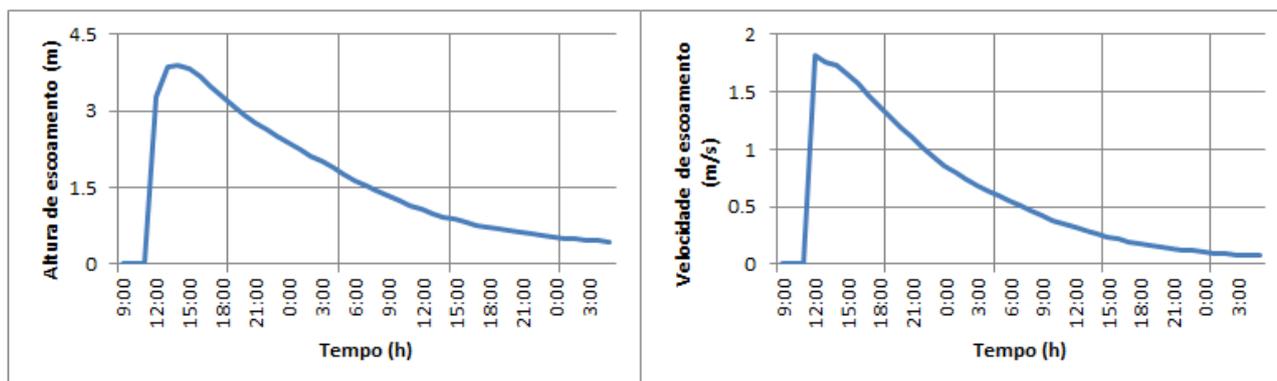


Figura 5 – Propagação da onda de cheia na posição de análise
Fonte: Próprio autor

A partir da Figura 5 nota-se que a velocidade máxima na posição de análise destacada chegou a 1,8 m/s e a altura de escoamento máxima a 3,6 m. Os diversos valores encontrados para essas variáveis a partir de sua distribuição espacial relacionadas com a Equação de Rotava *et al.* (2013) estabeleceram a relação de instabilidade por deslizamento para a onda de cheia pela ruptura hipotética da barragem conforme apresentadas na Figura 6.

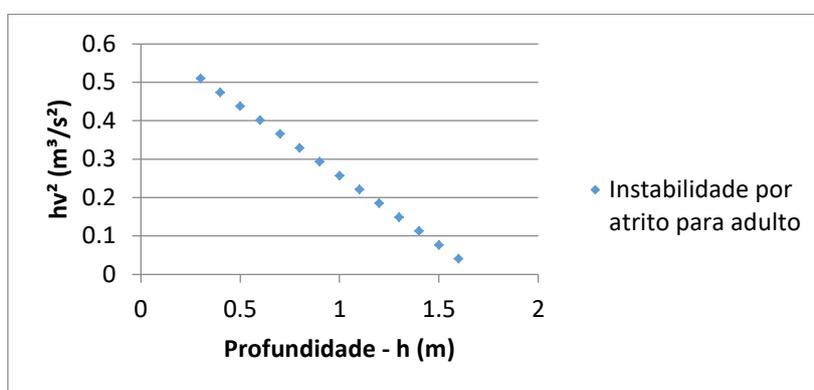


Figura 6 – Relações de hv^2 para diferentes profundidades de água
Fonte: Próprio autor

Observa-se que com velocidades de aproximadamente 1,5 m/s e alturas de escoamento de menos de 0,1 m (hv^2 de em torno de 0,2 m^3/s^2) o indivíduo já está susceptível a deslizar, resultado esse que confirma a afirmação de Rotava *et al.* (2013), que constatou que o deslizamento geralmente ocorre em regimes de escoamento supercríticos, com altas velocidades e baixas alturas de escoamento. A mancha de inundação que representa a instabilidade por deslizamento de uma parte na planície de inundação é apresentada na Figura 7.



LEGENDA

Adulto estável: $<0,07 \text{ m}^3/\text{s}^2$ 
Instabilidade por atrito: $\geq 0,07 \text{ m}^3/\text{s}^2$ 

Figura 7 – Mancha de inundação relativa à ocorrência de deslizamento em um recorte da área de estudo
Fonte: Próprio autor

A mancha de inundação da Figura 7 referente à instabilidade por atrito abrange grande parte da planície de inundação. E extensão dessa área é influenciada pela força de empuxo na equação de instabilidade de corpo humano, por “empurrá-lo para cima”, o deixando mais “leve” e assim, menos resistente a força de arrasto do escoamento.

CONCLUSÃO

Através da mancha de inundação estabelecida pelos resultados da relação numérica que define limites de instabilidade de corpo por deslizamento, segundo Rotava *et al.* (2013), observou-se que na maior parte da área atingida pela onda de cheia decorrente da ruptura hipotética da barragem, o indivíduo pode deslizar e que a consideração da força de empuxo na equação de instabilidade contribuiu para que isso ocorresse.

Estudos dessa natureza devem ser complementados com equações mais robustas, mas os resultados encontrados já apresentam o potencial da avaliação da ocorrência da instabilidade por deslizamento na planície de inundação decorrente da ruptura hipotética da barragem na tomada de decisão de órgãos gestores e gestão do risco nas áreas atingidas.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia – FAPESB pelo apoio financeiro a pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRIGHI, C.; OUMERACI, H.; CASTELLI, F. *Hydrodynamics of pedestrians' instability in floodwaters*. Hydrology and Earth System Sciences, v. 21, n. 1, pp. 515, 2017.

A TARDE. *Santa Helena inunda vale do Jacuípe*. Salvador, 10 mai. 1985. pp. 2-5. 1985.

BALBI, D. A. F. *Metodologias para elaboração de planos de ações emergenciais para inundações induzidas por barragens, estudo de caso: Barragem de Peti – MG*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Pós Graduação em Saneamento, Meio ambiente e Recursos Hídricos, Belo Horizonte, 2008.

BRUNNER, G. W. *HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual Version 5.0*. Davis, CA: US Army Corps of Engineers, 2016. 171 p. Disponível em: <<http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation.aspx>>. Acesso em: 04 de janeiro de 2018.

CHAUDHRY, M.H. *Open-channel flow*. 2 ed. Springer, 2008.

JONKMAN S.N., PENNING-ROUSELL E. *Human instability in flood flows*. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA), v. 44, n.4, pp. 1–11, 2008.

LIMA, G. M. P.; LESSA, G. C.; FRANKLIN, T. S. *Avaliação dos impactos da barragem de Santa Helena no trecho estuarino do rio Jacuípe, litoral norte da Bahia-Brasil*. Quaternary and Environmental Geosciences, n.2, 2010, pp. 40-54.

MENEZES, D. J. *Zoneamento das áreas de risco de inundação na área urbana de Santa Cruz do Sul – RS*. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria. 2014, 137 pp.

PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. *O modelo Muskingum-Cunge-Todini em rios com planície de inundação*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 20, n. 2 pp. 298-309, 2015.

ROTAVA, J.; MENDIONDO, E. M.; SOUZA, V. C. B. *Simulação de instabilidade humana em inundações: primeiras considerações*. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, pp. 1-8, 2013.

SECRETARIA DO SANEAMENTO E RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DA BAHIA - SSRH. *Acidente com a barragem de Santa Helena*. Salvador: LYRA et al. (Junta de consultores), 1985.

XIA, J.; FALCONER, J. A.; WANG, Y.; XIAO, X. *New criterion for the stability of a human body in floodwaters*. Journal of Hydraulic Research, v. 52, n. 1, p. 93-104, 2014.